

プレートカプセル型潜熱エネルギー貯蔵システムの性能シミュレーション

A Performance Simulation on Latent Heat Thermal Energy Storage System of Plate Capsule-Type

齋藤 武雄*

Takeo SAITO

野間 豪**

Tsuyoshi NOMA

Abstract

Theoretical and simulative analyses of the transient thermal performance for a phase-change thermal energy storage (TES) system using plate capsules are presented in this paper. In comparison with the spherical capsule-type unit, the present system has advantages that it has large volumetric ratio of PCM which occupies the storage tank and that the cost performance is better than the spherical-type unit.

The influences of the flow rate, the plate thickness, the pitch between the plate, and the Stefan number etc. on the thermal responses for charging and discharging processes are clarified in detail. Furthermore, a comparison of the thermal performance between the plate-type and the spherical-type latent heat TES units has been made.

The present simulation method and its results can be rigorously utilized for designing the efficient latent heat TES heat pump systems.

Key Words: Heat Pump Solar System, Latent Heat, Thermal Energy Storage, Simulation, Phase Change Material, Plate Capsule, Charging Process, Discharging Process

1. 緒言

現在、石油の供給は比較的安定しているものの石油の埋蔵量に限界があることは既に衆知の事実であり、石油に変わる新しいエネルギー源の確保および現存しているエネルギー資源の有効利用は重要な国策的課題である。近年、化石燃料大量消費による地球および都市の温暖化、酸性雨、大気汚染、海洋汚染や森林伐採などによる砂漠化などの地球環境問題が俄にクローズアップされている。これらの問題の解決のためには太陽熱（光）、地熱および風力などの自然エネルギーの積極的利用や、省エネルギー技術の開発によるエネルギーの効率的利用などが考えられる。しかし、自然エネルギーの実際的利用にあたっては、それらの持つ希薄性や間欠性、すなわち低密度、低温度のエネルギーであるという問題点を克服しなければならない。そのためには一旦エネルギーを蓄えて、必要に応じて取り出したり（平準化）、エネルギー密度を高める（高密

度化）のようなエネルギー貯蔵技術の開発が不可欠である。通産省が出た「21世紀のエネルギービジョン」によれば、間近に迫った21世紀は、アメニティ社会になることが予想され、現在より住環境が重視され、それに伴い家庭などにおけるエネルギー消費が大幅に増えるとしている。そのようなエネルギー多消費社会に対応するには石油などの1次エネルギー消費をあまり大きくすることなく、むしろエネルギー利用効率の向上をもって対処することが最も重要である。この意味でエネルギー貯蔵システムを組み込んだ低コスト、高効率の新しいエネルギー利用システムを構築することは急務となっている。

現在、熱の形のエネルギー貯蔵方式は、大別して水などを用いる顯熱型と、一定温度で潜熱を発生する性

* 東北大学 工学部、教授
Dept. of Mechanical Engineering II, Tohoku Univ.,
Sendai, Professor

**(株)東芝 重電技術研究所、研究員
Toshiba Corporation, Yokohama, Researcher

質を有する相変化物質(Phase change material; PCM)を用いた潜熱型とに分けられる。潜熱型は顯熱型に比べ大幅にエネルギー貯蔵空間を圧縮できること、および一様温度で潜熱が発生する質のよいエネルギー源であるという利点を有するため、近年各方面から関心が寄せられている^{(4)~(6)}。

現時点において潜熱エネルギー貯蔵の実用化を阻む要因としては次の諸点が挙げられる。(1)PCMのコスト、(2)使途に合う条件(適当な融点を持つこと、単位体積当たりの潜熱が大きいこと、熱容量が大きいことなど)を具備するPCMが得にくいこと、(3)PCMによっては、過冷却、相分離および反復使用による劣化がおこること、(4)カプセルなどの容器あるいは、シェルアンドチューブ型など熱交換器に似た特殊構造が必要であること、(5)一般に固相の熱伝導率が小さく、蓄・放熱速度が小さいことなどである。

これらの問題点を解決するために齋藤ら^{(7)~(9)}により球カプセル型潜熱エネルギー貯蔵システムが提示され、実験および性能シミュレーションが行われた。この結果、球カプセル方式は伝熱特性に優れ、エネルギー貯蔵・放熱時間を大幅に短縮できること、また、球体形状であるためエネルギー貯蔵槽の形状を問わないなどの特長を有することがわかった。しかし、球カプセル方式においては、球カプセルの製造および、PCM充填において技術的および経済的に依然として難がある。そこで、本論文においては、製造が容易で、しかも経済的に優れるとみられるプレートカプセルを採用した潜熱エネルギー貯蔵システムを取り上げた。

同一代表寸法であれば球の方がプレートより単位体

積当たりの伝熱量が大きくプレートカプセルは不利であるが、プレートカプセルはプレート厚を薄くすることにより、その欠点をカバーすることができる。

さらに、プレートカプセル方式は、球カプセル方式よりもエネルギー貯蔵槽内に占めるPCMの充填率を高めることができるという利点を持つ。

図1に示すようにプレートカプセルの中にPCMを封入し、エネルギー貯蔵槽内に積み重ねるプレートカプセル型潜熱エネルギー貯蔵方式について考え、性能シミュレーションの手法を提示し、それを用いて蓄・放熱過程に対する流量、プレート厚、プレート間ピッチ、ステファン数をパラメータとして変えることによる性能の変化を明らかにする。

さらに、球カプセル潜熱エネルギー貯蔵槽とプレートカプセル型潜熱エネルギー貯蔵システムの性能比較を行う。

提案したシステムは、高い成績係数を有するため、たとえば、潜熱エネルギー貯蔵ヒートポンプ／ソーラーシステムとして有望である。

記号

- a : 温度伝導率
- a_e : 熱媒体の有効温度伝導率
- A : アスペクト比($=D/W$)
- C_p : 定圧比熱
- D : プレート厚
- h : 熱伝達率
- H : エネルギー貯蔵槽高さ
- k : 熱伝導率
- k_e : 熱媒体の有効熱伝導率
- L : 潜熱

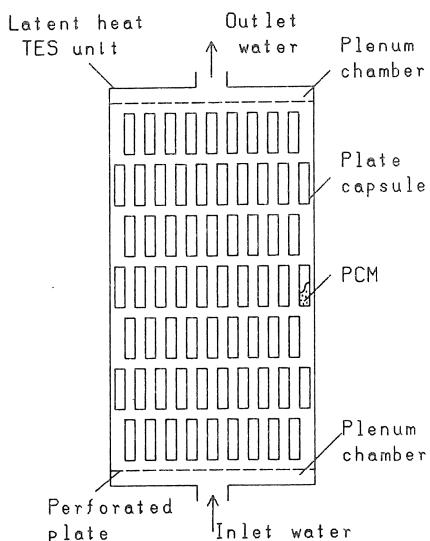


図1 プレートカプセル型潜熱ユニットのモデル(a)
(規則的に配置された場合)

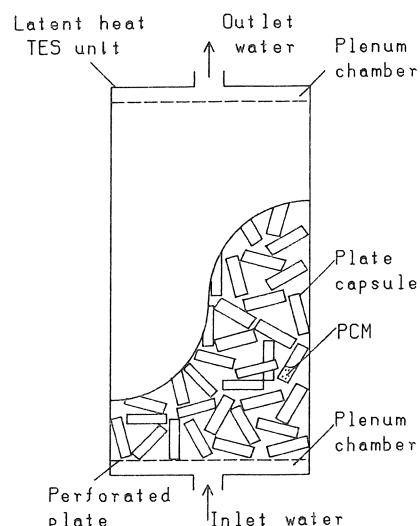


図1 プレートカプセル型潜熱ユニットのモデル(b)
(不規則的に配置された場合)

m	: 体積流量
n	: プレートカプセル枚数
P	: ピッチ
$q(z)$: 発熱速度
Q	: 発熱量
S	: プレートの長さ
Ste	: ステファン数 = $(C_{p,s} \cdot \Delta T / L)$
t	: 時間
T	: 流体温度
T_s	: PCM 固相温度
T_{in}	: 流入温度
T_m	: 融点または凝固点
ΔT	: $(= T_{in} - T_m)$
u	: 流速
U	: コンダクタンス
v	: プレートカプセル体積
V	: エネルギー貯蔵槽容量
W	: プレート幅(エネルギー貯蔵槽代表寸法とする)
X	: 界面位置
X_c	: プレート内厚さ/2
X_e	: $(= D/2)$
z	: 高さ方向座標
α	: プレートカプセルの体積比($=nv/V$)
β	: 係数 [式(9)]
Γ	: プレートカプセルの配列による係数($= 2WSn/V$)
ρ	: 密度
添字	
$+$: 無次元量
c	: プレートカプセル
f	: 热媒体
s	: PCM 固相

2. シミュレーション解析

2.1 基礎方程式

プレートカプセルエネルギー貯蔵ユニットの性能について数値シミュレーションを行う。図2にはシミュレーションのモデルおよび座標系を示した。座標系は流れ方向を z とし、プレートカプセルについては図に示すように、中心線を原点とし、プレート厚方向を x とした。また、図に示すように初期温度が融点のエネルギー貯蔵槽に温度 T_{in} の熱媒体(ここでは水)が流量 m で流入する。

解析を進めるにあたり次の仮定を導入する。

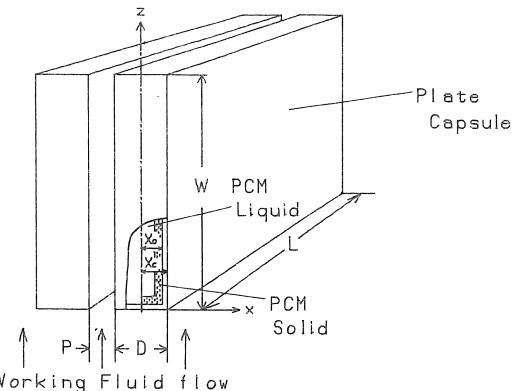


図2 プレートカプセルのシミュレーションモデルと座標系

(1) カプセル内の熱移動は準定常である。

(2) 相変化は潜熱集中型である。

(3) 相変化による体積変化は考えない。

(4) 液相の初期温度は一様で融点とする。

(5) 温度場は中心線に関し対称とする。

さらに、各々のプレートカプセルにおいて凝固が進行するとし、潜熱の発生を考慮する。エネルギー貯蔵ユニット内に単位体積の微小要素をとり、エネルギー貯蔵槽内の温度は同じ高さでは同じであり、 z 軸方向にのみ温度分布が存在し、流速 u で水が流入するとする。

解析にあたり次のように無次元化を行う。

$$\begin{aligned} T^+ &= \frac{T}{|T_{in} - T_m|}, \quad u^+ = \frac{X_c}{a_e} u \\ X^+ &= \frac{X}{X_c}, \quad z^+ = \frac{z}{X_c} \\ t^+ &= \frac{a_e}{W^2} t, \quad P^+ = \frac{P}{H} \\ \dot{m}^+ &= \frac{\dot{m}}{a_e X_c}, \quad A^+ = \frac{A}{H} \end{aligned} \quad (1)$$

プレートカプセルまわりの熱媒体のエネルギー保存則は次のようにになる。[(2)式の誘導については巻末のAppendixに示す。]

プレートカプセル充填槽の一般的モデルとしては、Fig. 1 (b)に示すように任意のアスペクト比をもつプレートカプセルが3次元的にランダムにパックされた槽が考えられる。プレートカプセルの形状は、たとえば、硬貨のように円板状であっても構わないし、四角形であっても構わない。実用的には熱媒体の流路を確保するため中央部分に貫通孔を設けたり、接触しないように表面に突起を設けたりする工夫が必要である。特別な場合は、Fig. 1 (a)に示すようにプレートカプセルが規則的に配置された場合である。この場合でも

カプセル周囲の熱媒体の流れおよび熱の流れは、カプセルの存在により複雑となり熱媒体の熱伝導率も有効熱伝導率を採用する必要がある。

$$(1 - \alpha) \frac{\partial T^+}{\partial t^+} + u^+ \frac{\partial T^+}{\partial z^+} = \frac{\partial^2 T^+}{\partial z^{+2}} + q^+(z) \quad (2)$$

ここに, $q^+(z)$ は、PCM を封入したプレートカプセルによる単位体積当りの発熱速度を表し、凝固の際の界面の移動量から以下のように得られる。

$$q^+(z) = \Gamma \frac{k_s}{k_e} \cdot \frac{\frac{T_m - T^+}{\Delta T}}{1 + \beta - X^+} \quad (3)$$

Γ は単位体積当りのプレートカプセルの個数により定まる係数であり、プレートカプセルの大きさ、配列により定まる。また、準定常近似を用いることにより一次元凝固となり、積層プレート層の総コンダクタンス U は、次式により与えられる。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{W \times S} \left(\frac{X_c - X}{k_s} + \frac{X_o - X_c}{k_c} + \frac{1}{h} \right) \quad (4)$$

ここで、 h は平行プレート間を流れる流体の熱伝達率を表し、長方形管内の層流熱伝達として、文献⁽¹⁴⁾から求めた。式(4)を用いるとプレートカプセル内の温度分布が次のように表せる。

$$\frac{T_s - T_m}{T - T_m} = \frac{X - x}{X - X_c + \frac{k_s}{k_c} (X_c - X_o) - \frac{k_s}{h}} \quad (5)$$

さらに凝固により発生した熱量は全て固相およびカプセルの熱伝導により運び去られたとすると、凝固界面における熱バランス式は以下のようになる。

$$-\rho_s L \frac{dX}{dt} = -k_s \frac{dT_s}{dx} \Big|_{x=X} \quad (6)$$

これと固相の温度分布を表す式(5)により無次元界面位置 X^+ は次式のように表せる。

$$(X^+)^2 - 2(1 + \beta) X^+ = 2 \frac{a_s}{a_e} Ste \int_0^{t^+} \left(\frac{T_m - T^+}{\Delta T} \right) dt^+ - 1 - 2\beta \quad (7)$$

ここで、 Ste はステファン数を表し、以下のように定義される。

$$Ste = \frac{C_{p,s} \cdot \Delta T}{L}, \quad \Delta T = |T_{in} - T_m| \quad (8)$$

また、 β はプレートカプセルの熱伝導およびプレートカプセルと周囲流体との熱伝達の寄与を表し、次式のように表す。

$$\beta = \frac{1}{X_c} \frac{k_s}{k_c} (X_c - X_o) + \frac{k_s}{h} \quad (9)$$

初期条件はエネルギー貯蔵槽内の流体温度が凝固点で

一様であるとして次のようになる。

$$t^+ = 0; \quad T^+ = \frac{T_m}{\Delta T} \quad (10)$$

また、境界条件は温度 T_{in} の水が流量 m でエネルギー貯蔵槽に流入するとし、流出側は吹抜けになるとして次式で与える。

$$z^+ = 0; \quad T^+ = \frac{T_{in}}{\Delta T} \quad (11)$$

$$z^+ = \frac{H}{X_c}; \quad \frac{\partial T^+}{\partial z^+} \Big|_+ = \frac{\partial T^+}{\partial z^+} \Big|_-$$

2.2 数値解法

上記の基礎式の式(2), (3), (7)を境界条件として式(10), (11)のもとに連立し、差分法を用いて数値的に解析する。これにより周囲流体およびプレートカプセル内部温度が求められる。

物質を変えてシミュレーションを行う場合は、上式中の物性値 a_s , k_s および、 Ste 数を入れ替えることにより計算すればよい。

2.3 シミュレーション結果

以下にプレートカプセル型潜熱エネルギー貯蔵槽について、種々のパラメータを変えた場合のシミュレーション結果を示す。シミュレーションに当たって用いたPCM は磷酸水素 2 ナトリウム($Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$)である。融点は36°Cであるが、凝固過程においては過冷却を起こすので凝固点を実際より低い温度に仮定してシミュレーションを行う。本シミュレーションにおいては流入温度を16°Cとし凝固点を28°Cと仮定した。なお、 $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ の凝固過程において融点を28°Cと仮定したときの球カプセル潜熱エネルギー貯蔵システムの実験値とシミュレーションの比較を図3に示す。プレートカプセルの場合の実験結果がなく、本シミュレーション結果との対比ができるないが、図3は、過冷却によるみかけの凝固点降下の度合を示すため示したものである。両者の一致は良好である。主な物性値は、Table 1として示した^{(12) ~ (14)}。エネルギー貯蔵槽容量は2.2m³とした。なお、図3の実験データは、文献⁽¹⁵⁾によった。

図4には、アスペクト比 $A^+ = 0.08$, ピッチ $P^+ = 0.5$, $Ste = 0.07$ とした場合に、パラメータとして流量を採用したときの流出水温の時間変化を示した。図から、流量が小さい場合は流出水温は緩慢に低下し、上に凸の応答曲線が得られるが、流量が大きくなるにつれて、最初急激に低下し、後に緩やかになる下に凸の応

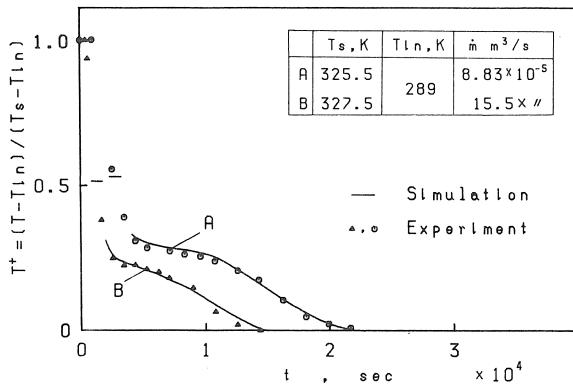


図3 球カプセル型の場合のシミュレーション結果と実験結果

Table 1 Principal physical property of $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Symbol	T_m	L	k	C_p	ρ
Unit	K	kJ/kg	W/mK	kJ/kgK	kg/m ³
Solid	309	263	1.59	1.63	1520
Liquid			1.00	1.93	1450

答特性が現れる。これは流量が小さいときには、滞留時間が長いためエネルギー貯蔵槽内の下から順次、凝固が進行し、周囲の流体に潜熱を放出し、融点付近の温水が流出するためである。流量が大きくなると十分熱交換できないまま流出口に達するため、最初急激に温度度が下がる。この結果、エネルギー貯蔵槽全体の温度が下がり、全体で凝固が進行するため後半で流出水温の変化が緩慢になると考えられる。

図5には、図4と同じ条件で流量 $m^+ = 10000$ とし、Ste数とピッヂを固定しパラメータとしてアスペクト比 A^+ を変えた場合についての流出水温の時間変化を示した。図からアスペクト比が小さくなると初期の一定温度範囲が拡大すること、および流出水温の時間変化が急激になり、ステップ変化に近づいてゆくことなどがわかる。これはアスペクト比を小さくすればエネルギー貯蔵槽に入るプレートカプセルの個数が増し、プレートカプセル全体の表面積が増大し、熱伝達が促進されることに加えて、式(7)に示されるように相変化速度が大きくなるためである。

また、各々の応答特性は時間が $t^+ = 2 \sim 2.5$ 、温度が $T^+ = 0.6 \sim 0.7$ 付近で交差する。このことから流量が一定の場合、最低使用温度を $0.6 \sim 0.7$ 以上にとればアスペクト比が小さいほど、使用可能な時間が長く、逆に $0.6 \sim 0.7$ 以下とすればアスペクト比が大きいほど長くなり、 $0.6 \sim 0.7$ の前後で逆転することがわかる。すなわちプレートカプセル型潜熱エネルギー貯蔵槽では

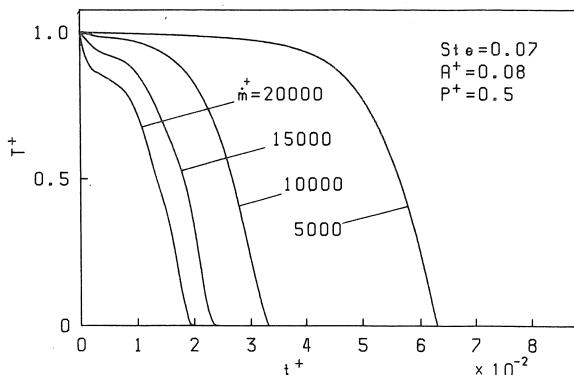


図4 流量を変化させた場合の温度応答

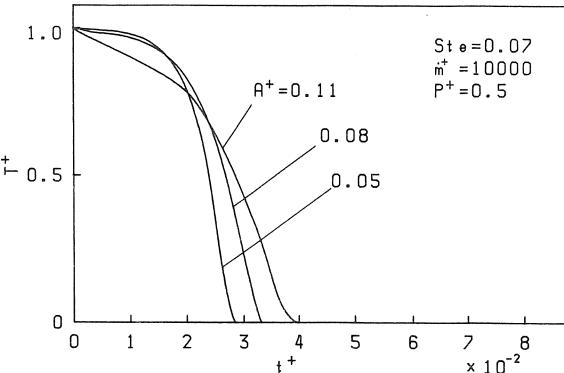


図5 アスペクト比を変化させた場合の温度応答

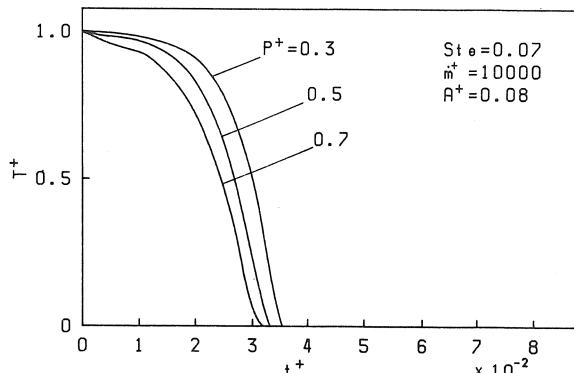


図6 ピッチを変えた場合の温度応答

プレートカプセルのアスペクト比を適当に選ぶことによりエネルギー貯蔵槽のニーズに合わせて、その応答特性を設定することが可能になることが知れる。

なお、球カプセル型の場合も直径と蓄熱槽高さの比をアスペクト比と考えれば、同様のことが言える。

図6に図4と同じ条件で流量、ステファン数(Ste)、アスペクト比を固定した場合にピッヂ P^+ をパラメータとしたときの流出水温の時間変化を示した。ピッヂを大きくすると充填率が小さくなり、全放熱量は減り、放熱速度は大きくなる。しかし、図によると、ピッヂの違いによる影響はあまり大きくなことがわ

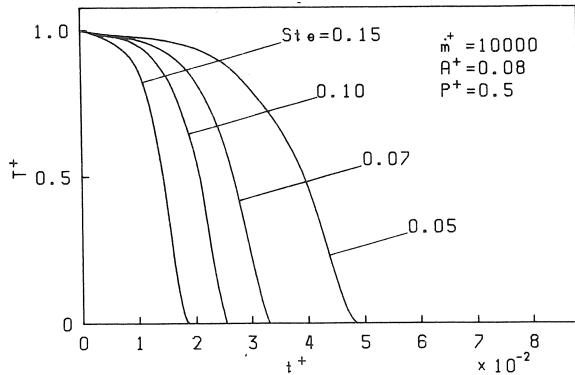


図7 ステファン数を変えた場合の温度応答

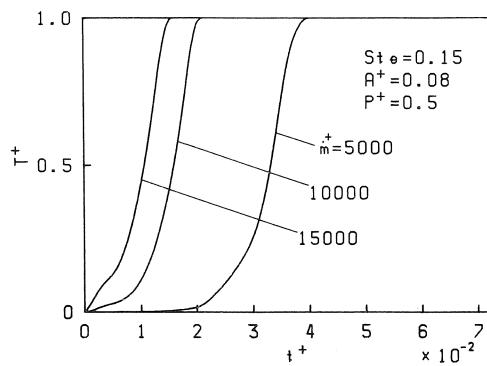


図8 流量をパラメーターとした時のエネルギー貯蔵過程

かる。これは、ピッチを小さくすると、プレートと流体との熱伝達率が大きくなるためである。したがって、エネルギー貯蔵容量を大きくするため、ピッチをできる限り小さくとる方が有利であることがわかる。

図7には図4と同じ条件で流量、アスペクト比、ピッチを固定し、 Ste をパラメータとしたときの流出水温の時間変化を示した。 Ste を変化させたときの応答特性の変化は大きく異なり、流入温度の設定、あるいはPCMの選択により応答特性はかなり左右されることがわかる。また、ステファン数が小さくなると放熱速度が大きくなることがわかる。これは、式(7)からわかるように相変化速度が小さくなるからである。本シミュレーションにおいては、PCMの物性値は変化しないとしているので Ste と ΔT は比例し、したがって放熱終了までの時間は ΔT の大きさに比例する。

次に融解過程のシミュレーション結果を示す。

シミュレーションにおいては、簡単のため、液相における自然対流の影響を無視した。球カプセル内の融解のシミュレーションでは液相内の自然対流の蓄熱率に及ぼす影響が小さいことが判っている⁽¹⁵⁾。

プレートカプセルについては、同じ仮定が成立するかどうか確認されていないが、少なくともアスペクト比の大きい垂直カプセルの場合は自然対流の寄与が小

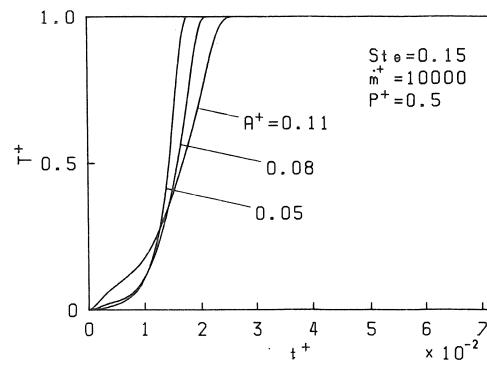


図9 アスペクト比をパラメーターとした時のエネルギー貯蔵過程

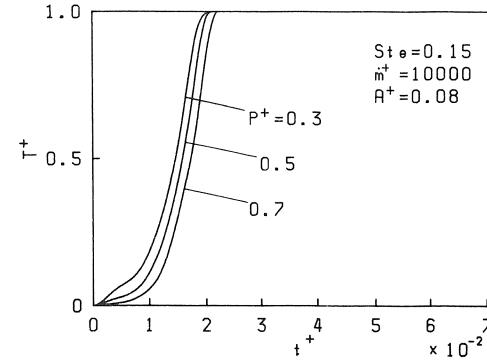


図10 ピッチをパラメーターとした時のエネルギー貯蔵過程

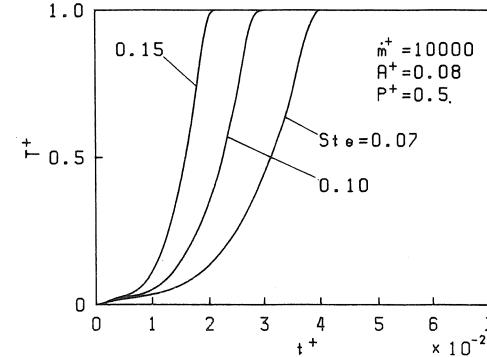


図11 ステファン数をパラメーターとした時のエネルギー貯蔵過程

さいと推定できる。

図8に $Ste=0.15$, $A^+=0.5$, $P^+=0.5$ とし、流量をパラメータとしたときの、流出温度の時間変化を示す。図4に示した凝固過程の場合とほぼ逆になることがわかる。

さらに、図9、図10、図11にそれぞれアスペクト比、ピッチおよび、 Ste をパラメータとした場合についての温度応答を示す。

以上に示したようにエネルギー貯蔵過程における特性は放熱過程の場合とちょうど逆になっていることが分かる。融解完了の時間が凝固完了の時間より短いことの理由は、融解の場合は液相内の自然対流の影響に

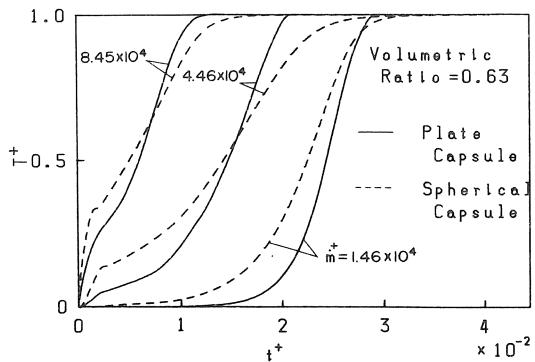


図12 プレートカプセルと球カプセルの温度応答の比較（タンク容量：0.3m³、球カプセル内径3.5cm、板内厚2.88cm）

より熱伝達が促進されることと、一方、凝固の場合は、凝固相が熱抵抗となることに起因する。

3. 球カプセル方式とプレートカプセル潜熱エネルギー貯蔵システムの性能比較

最後に球カプセル方式とプレートカプセル方式との性能比較を行う。図12に両方式共にタンク容量、充填率がそれぞれ0.3m³、および0.63とし、球カプセル内半径を3.5cm、プレート内厚を2.88cmとした時の流出水温の時間変化を示す。図からわかるように同じ充填率でもプレートの厚さを薄くすることにより球カプセル方式よりも蓄熱速度を大きくすることが可能である。

なお、両者の厳密な比較には、ステファン数やピッチなども影響するが、ここでは、代表例を示すにとどめた。

4. 結 言

本研究において、プレートカプセル潜熱エネルギー貯蔵システムについて種々のパラメータ変化に対応させて数値シミュレーション手法を提示した。それを用いて行ったシミュレーションの結果、次のことが明らかになった。

(1) 流量が小さいときプレートカプセル内のPCMの凝固は槽下部から順次起こり、流出水温は上に凸の応答特性となるが、流量を増してゆくとエネルギー貯蔵槽全体で凝固が起こるようになり下に凸の応答特性となる。

(2) プレートカプセルの厚さが小さいほど、流出水温の応答特性はステップ応答に近づく。またプレート厚さを変えることで最低使用温度の持続時間が変わり、プレートカプセルエネルギー貯蔵ユニットではプレートの厚さを適切に選ぶことにより要求される性能

に合わせた特性が設定可能となる。

(3) 流出水温の応答特性はステファン数によって大きく異なる。したがって、流入水温あるいはPCMの選択はエネルギー貯蔵ユニットにとって大きな因子となる。

(4) プレートピッチを変化させたときの応答特性の違いは少ない。したがってエネルギー貯蔵・（蓄冷）量を大きくするためにピッチは詰めた方がよい。

(5) PCM充填率が同じであっても、プレート厚さ、ピッチを適切に選ぶことにより、プレートカプセル方式は球カプセル方式と同等の性能を得ることができる。したがって、カプセル製造および、PCM充填の容易なプレートカプセルエネルギー貯蔵システムは、より実現性の高いエネルギー貯蔵方式である。

最後に、本研究で得られたシミュレーション手法に任意のPCM、動作流体の種類、流量、プレート厚さ、プレートピッチ、ステファン数、および入口温度などに対応でき、さらに蓄熱・蓄冷両モードを扱える汎用性のある手法であり今後の応用が望まれる。

おわりに、本研究の取りまとめに際し助力をしてくれた本学大学院加藤和三君に謝意を表する。

Appendix 基礎式の誘導について

いま、カプセルベッドの基礎方程式を導くため、付図1に示すような微小要素を考え、z方向のエネルギーバランス（流れも考慮）を考える。

まず、A面から熱伝導により流入する熱量は、

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy dt \quad (a)$$

同様に、流れにより運び込まれる熱量は、

$$\rho C_p u T dx dy dt \quad (b)$$

である。一方、距離zだけ離れたB面から流出する熱量は、それぞれ、

$$- \left[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) dz \right] dx dy dt, \quad (c)$$

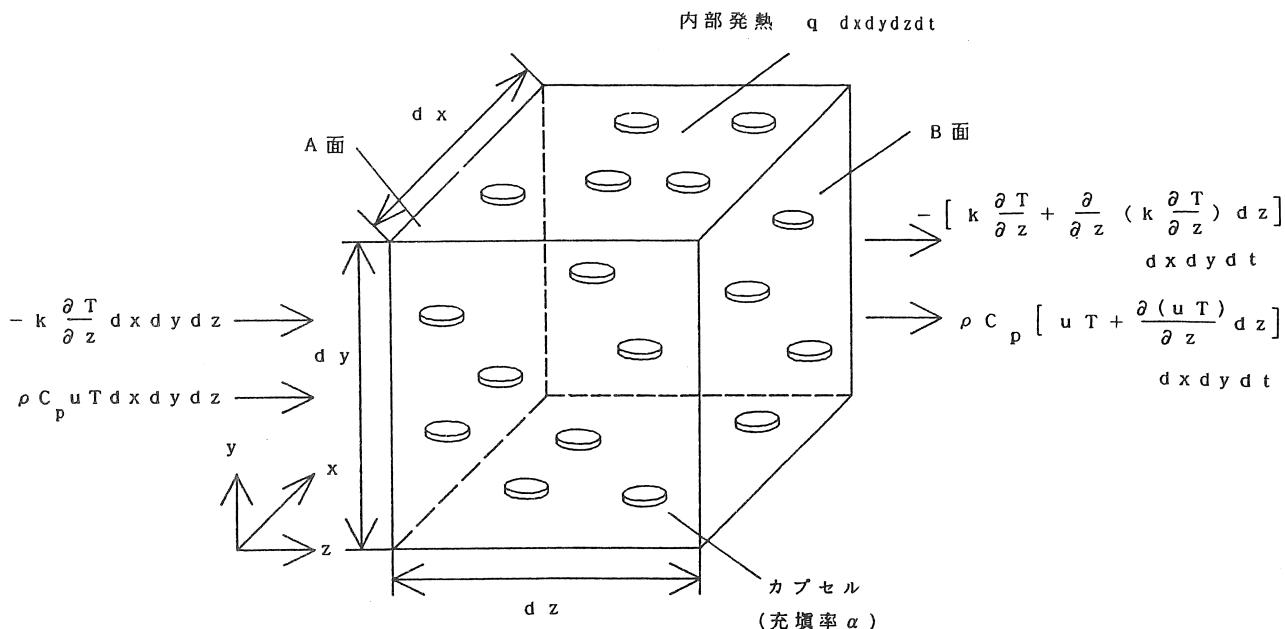
$$\rho C_p \left[u T + \frac{\partial (uT)}{\partial z} dz \right] dx dy dt \quad (d)$$

となる。故に、z方向には差し引き

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) dx dy dz dt \\ & - \rho C_p \frac{\partial (uT)}{\partial z} dx dy dz dt \end{aligned} \quad (e)$$

だけの熱量が蓄えられる。〔x, y方向も同様にして導ける。〕

一方、この熱量により6面体微小要素内の流体の温



付図1 カプセルベッド内の微小要素

度が ΔT だけ上昇するすれば、その熱量は、

$$\rho C_p \Delta T dx dy dz (1 - \alpha) \quad (f)$$

となり、結局これが(e)式 [x , y 方向は無視] と釣り合うから次の基礎式をうる。

$$\begin{aligned} & \rho C_p (1 - \alpha) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (g)$$

若し、微小要素内に単位体積、単位時間あたり $q(z)$ の発熱があれば、式(g)は、次式となる。

$$\begin{aligned} & \rho C_p (1 - \alpha) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(z) \end{aligned} \quad (h)$$

ここに、用いた記号は、

T : 流体の温度, t : 時間, x , y , z : 座標, ρ : 流体の密度, C_p : 流体の比熱, である。

式(h)の u は、いわゆる空筒（もしくは塔）速度 (Superficial velocity) で、 $(1 - \alpha) v$ に等しい。

ここに、 v はカプセル（粒子）間を流れる流体の速度 (interparticle velocity) である。

参考文献

- (1) 齋藤武雄, 広瀬宏一, 冷凍, 54 (624), 845–852 (1979)
- (2) Bathelt,A.G., Viskanta.R.and Leidenfrost.W. Trans. ASME, J. Heat Transfer., 101,

453–458 (1979)

- (3) Saitoh,T. and Hirose,K., Trans.ASME,J. Heat Transfer., 104, 545–553 (1982)
- (4) Green,T.F. and Vliet,G.C., Trans.ASME, J.Solar Energy Eng., 103, 275–280 (1981)
- (5) 三谷, 松井, 遠藤, 東芝レビュー, 38 (9), 829 (1983)
- (6) 齋藤武雄, 広瀬宏一, 冷凍, 59 (680), 519–525 (1984)
- (7) 齋藤武雄, 広瀬宏一, Trans.JSME, 51(466), 1867–1873 (1985)
- (8) 昭和55年度サンシャイン計画委託調査研究成果報告書, 太陽熱発電システムにおける蓄熱技術の調査研究, 133 (1981) 日本電機工業会
- (9) 齋藤武雄, 広瀬宏一, 冷凍, 58 (670), 749–756 (1983)
- (10) 齋藤武雄・広瀬宏一, 冷凍, 58 (672), 933–940 (1983)
- (11) 小坂岑雄, 朝比奈正, 峰田博史, 名古屋工業技術試験所報告, 29 (2), 53 (1980)
- (12) NASA Contractor Rep./CR-61863, 1 (1971)
- (13) Schröder,J. and Gawron,K., Energy Res., 5, 103 (1981)
- (14) 日本機械学会, 伝熱工学資料 (第4版) (1986)
- (15) 齋藤武雄・広瀬宏一, 機論(B編), 51–462, 705 (1985)

(平成元年7月3日 原稿受理)